姜黄素的生理功能及其在畜禽生产中的应用

杨　泰　王　慧　田科雄* 陈继发

(湖南农业大学动物科学技术学院，长沙 410128）

摘　要：姜黄素是一种从姜黄根茎中提取得到的黄色色素，具有抗氧化、抑炎及降血脂等作用。作为一种天然的饲料添加剂，姜黄素在畜牧生产中具有良好的应用前景，有改善畜禽生产性能、提升产品品质、提高免疫力等作用。本文阐述了姜黄素的生理功能及其作用机制，并综述了国内外学者在畜禽生产中应用姜黄素的最新研究成果，以期为姜黄素在畜禽生产中更好地应用提供参考。

关键词：姜黄素；植物提取物；生理功能；机制；畜禽生产；应用

中图分类号：S816.7

姜黄素是姜黄中的有效成分，作为一种植物提取物，其广泛存在于姜科姜黄属多年生植物，如姜黄、莪术、郁金等的根茎中[1]。不同产地的姜黄所含姜黄素的量存在较大差异，其含量通常在2%~9%[2]。姜黄素在1815年被首次发现，并于1910年首次化学表征[3]。在过去几十年中，姜黄素的研究主要集中在抗氧化、抗炎、降脂、癌症化学预防和潜在的化学治疗性质等医药学方面[4]。根据 Web of Science 中检索“Curcumin”后的结果分析，动物学研究方向论文仅占所有文献（15 462 篇）的 2.75%，因此姜黄素在畜牧生产中的研究尚处于起步阶段。随着人们环境保护和畜产品安全意识的不断提升，抗生素使用不当等问题的日益突出，姜黄素凭借其来源天然、无残留、具有抗氧化、抗炎等生理功能的优势，成为一种颇具潜力的绿色植物源性添加剂。但现阶段姜黄素推广应用程度并不高，其原因主要集中在于姜黄素在不同种类畜禽生产中的添加量及其作用机理尚不明确。因此，本文旨在综述近年来国内外关于姜黄素的研究，总结其生理功能及在畜禽生产中的应用效果与可能机制，以期为姜黄素的开发和利用提供理论参考。

1　姜黄素的理化性质

姜黄素（分子式 $C_{21}H_{20}O_6$）是一种结晶状的橙黄色粉末，熔点为 183 ℃，极不易溶于水，易溶于有机溶剂。在酸性和中性的环境中稳定，在碱性条件下极不稳定[5]。化学结构中，姜黄素有一个 α，β－不饱和－β－二酮基，且在 2 个苯环上分别有酚羟基和甲氧基结构[6]。

2　姜黄素的生理功能及其作用机制

2.1　抗氧化作用

自由基是机体在新陈代谢过程中产生的一类具有强氧化性的基团，具有调节细胞生长等

收稿日期：2017－03－08

作者简介：杨　泰（1991－），男，内蒙古呼和浩特人，硕士研究生，从事动物营养学与饲料资源开发利用研究。E-mail: t-tai@foxmail.com

*通信作者：田科雄，教授，硕士生导师，E-mail: tiankexiong@163.com

生理功能，但过多的自由基积累会对机体产生损害。为及时清除动物机体内过度的自由基，出现了多种抗氧化饲料添加剂，姜黄素作为一类天然抗氧化剂，受到了各界学者的广泛关注。

2.1.1　姜黄素自身抗氧化性在抑制脂质过氧化中的调节机制

研究表明，姜黄素具有强抗氧化作用，其强抗氧化性来源于自身结构，姜黄素中酚类结构可以捕捉自由基后形成强稳定性的醌类物质[7]。此外，Osawa 等[8]和 Sugiyama 等[9]报道，姜黄素从肠道中吸收后，在细胞中经过氢化作用生成具有强抗氧化性的四氢姜黄素，与自由基结合后降解成为另一个具有抗氧化活性的物质 2' – 甲氧基丙酸，此物质可进一步结合自由基，因此体现出双重抗氧化功能。但目前对于姜黄素抗氧化作用的核心基团的确定仍存在争议，Jovanovic 等[10]认为核心基团为 β – 二酮单元；Priyadarsini 等[6]认为以酚羟基为主，甲氧基协同促进抗氧化性的作用；而 Miriyala 等[11]则认为归因于酚基团和甲氧基团与 1，3–二酮结合的双烯系统的结合。

研究表明，在 2,2 – 偶氮二（2– 甲基丙基咪）二盐酸盐[2,2'-azobis(2-methylpropionamidine)dihydrochloride,AAPH]建立的氧化应激模型中，添加姜黄素可以抑制人体红细胞[12]和鸡红细胞[13]的溶解和凋亡。其原因可能是姜黄素具有脂溶性，从而可以进入细胞膜，捕捉自由基，抑制自由基介导的脂质过氧化反应，对红细胞中的膜结构进行保护。也有研究表明，添加姜黄素对慢性热应激的肉鸡胸肌线粒体肿胀有显著的缓解作用[14]。线粒体在新陈代谢过程会产生大量的活性氧(reactive oxygen species，ROS)[15]，因此线粒体也是机体内最先遭受自由基损伤的结构，氧化损伤主要针对 DNA 与膜结构中的不饱和脂肪酸[16]。Waseem 等[17]在大鼠上建立的顺铂诱导的氧化损伤模型试验中发现，姜黄素可以显著降低线粒体内脂质过氧化水平和蛋白质羰基的含量，减轻应激损伤。Trujillo 等[18]的试验也发现姜黄素对氧化应激造成的纤维化和肾紧密连接蛋白的减少有缓解作用。此外，Dorta 等[19]发现，天然的黄酮类吸收后可特异性聚集在线粒体中，起到保护机体的作用。由此推断，姜黄素可通过捕捉线粒体中的自由基，从而抑制线粒体内脂质的过氧化损伤，起到保护机体免受氧化损伤的作用。

2.1.2　诱导激活核因子 E2 相关因子 2（nuclear factor erythroid 2-related factor 2，Nrf2）–抗氧化反应元件(antioxidant responsive element，ARE)抗氧化信号通路

ARE 是机体应对 ROS 损伤、生成各类抗氧化蛋白的重要调控元件，而 Nrf2 可以激活 ARE[20]。在正常的生理条件下，Nrf2 存在于细胞质当中，最终被降解；氧化应激情况下，Nrf2 改变构象进入细胞核，与抗氧化原件 ARE 结合，激活抗氧化酶基因和二项解毒酶等的 mRNA 和蛋白质表达，提升机体抗氧化能力[21]。研究表明，在砷诱导氧化损伤中，姜黄素可以上调肝 Nrf2 蛋白下游基因醌氧化还原酶（*NQO*1）与血红素氧合酶 1（*HO*-1）的表达量，进而影响 *Nrf*2 表达量，从而缓解机体的抗氧化损伤[22]。Sahin 等[23]在鹌鹑热应激条件下也发现，姜黄素可以通过调节 Nrf2/HO-1 途径缓解应激损伤。也有研究发现，在氧化应激产生后，添加姜黄素可以显著提高细胞内谷胱甘肽（glutathione，GSH）的含量，从而起到抗氧

化的效果[24]。通过 *Nrf2* 基因敲除鼠模型研究，发现缺失 *Nrf2* 基因使肝细胞 GSH 含量减少[25]。因此，姜黄素提高 GSH 含量可能也与激活 Nrf2 通路有关。同时，在 Zheng 等[26]的研究中发现，姜黄素的添加也可以直接诱导上调 GSH 合成限制酶——谷胱甘肽半胱氨酸连接酶（glutathione cysteine ligase，*GCL*）的 mRNA 和蛋白质表达量，进而促进机体内 GSH 的合成，达到提高机体抗氧化能力的效果。然而，也有学者认为，姜黄素可能并不是一种绝对的抗氧化剂，体外试验结果表明，姜黄素浓度从 1 μmol/L 升高到 25 μmol/L 的过程中，ROS 水平显著上升，认为可能与姜黄素激活产 ROS 的线粒体酶有关[27]。

综上所述，姜黄素抗氧化的调节主要通过 2 种途径来实现：一方面，姜黄素利用自身结构具有的抗氧化性发挥作用；另一方面，姜黄素可以作为诱导剂，促进抗氧化信号通路中相关基因的表达，促进抗氧化蛋白和酶类的产生，提高机体抗氧化能力。

2.2　抑炎作用

研究表明，机体内环氧合酶（cyclooxygenase，COX）和脂肪氧化酶（lipoxygenase，LOX）可以催化花生四烯酸形成各类前列腺素等炎性介质，引起炎症反应。而研究发现，姜黄素与 COX 和 LOX 具有拮抗作用，能够限制炎性介质产生，达到抗炎效果[28]。另一方面，一氧化氮（NO）是有关炎症反应重要的信号分子，添加姜黄素可以抑制诱导型一氧化氮合酶在 *L*－精氨酸转化成 NO 中的催化作用[29]。另外，核转录因子－κB（nuclear factor kappa B，NF-κB）信号通路是炎症相关的重要信号通路，过多的炎性介质会激活 NF-κB，使其与抑制蛋白－κB（inhibitor κB，IκB）脱离，进入细胞核激活炎性介质基因的表达，加重炎症反应[30]，肿瘤坏死因子（tumor necrosis factor-alpha，TNF-α）是激活 NF-κB 的重要炎性介质。据彭景华等[31]的报道，姜黄素预处理库普弗细胞（Kuppffer cell，KC）可显著降低脂多糖（lipopolysaccharide，LPS）应激产生的白细胞介素（interleukin，IL）－1β 和 IL-6 水平，对于 TNF-α 的蛋白表达量也具显著抑制效果。Reuter 等[32]的研究中也发现，姜黄素可以抑制细胞中众多 TNF-α 激活途径。

综上所述，姜黄素发挥抑炎作用的途径主要集中在 2 个方面：一方面通过抑制产生炎性介质的酶类活性，减少炎性介质产生，从而抑制炎性反应；另一方面通过抑制 TNF-α 等炎性因子，阻止其对 NF-κB 信号通路的激活，进而减少炎性因子表达，起到抑制炎症反应的作用。

2.3　降脂作用

早在 1971 年就有研究发现，姜黄素具有降脂的作用[33]。之后也有研究表明，给小鼠饲喂高胆固醇饮食，同时使用姜黄素治疗 18 周，发现与对照组相比，姜黄素可以降低血浆胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白和载脂蛋白 B 水平，增加血浆高密度脂蛋白和肝脏载脂蛋白 A 的表达[34]。以 22%脂肪含量和 500 mg/kg 的高脂饲粮饲喂雄性 C57BL/6 小鼠 12 周，研究发现姜黄素可以抑制高脂饲粮带来的体重增加。并认为这与姜黄素激活脂肪细胞中能量代谢和脂肪酸 β－氧化的主要开关，磷酸腺苷激活的蛋白激酶（adenosine

monophosphate-activated protein kinase，AMPK）有关。同时，体外试验表明，姜黄素可以活化肉碱棕榈酰转移酶 1（carnitine palmitoyltransferase 1，CPT-1）从而促进 β－氧化，而对于参与脂质生物合成的酶如甘油－3－磷酸酰基转移酶 1（glycerin-3-phosphate transferase，GPAT1）和酰基辅酶 A 羧化酶就表现出抑制作用[35]。

2.4　抗菌抗虫作用

早在 1949 年就有关于姜黄素抗菌作用的研究，已经证明姜黄素对于金黄色葡萄球菌、石癣菌、副伤寒沙门氏菌和结核分歧杆菌都有抑制作用[36]。研究表明，体外培养试验中添加 100 μmol/L 的姜黄素可降低 80%的大肠杆菌[37]。Lüer 等[38]的研究也发现，暴露在 100 μmol/L 姜黄素下，金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌致死率为 100%。粪肠球菌在 200 μmol/L 的姜黄素中处理 4 h，致死率可以达到 80%。由此可知，姜黄素对于革兰氏阳性菌（金黄色葡萄球菌和粪肠球菌）与革兰氏阴性菌（大肠杆菌和铜绿假单胞菌）都有抑制作用。据 Tyagi 等[39]的研究报道，将 10^6 CFU/mL 密度的金黄色葡萄球菌暴露于 100 μmol/L 姜黄素下，2 h 后全部被杀死。通过碘化丙锭和钙黄绿素 2 种透化指示荧光探针的标记发现，94%~98%金黄色葡萄球菌细胞膜被破坏，出现渗漏。由此可以说明，姜黄素抑菌机制是通过破坏细菌膜结构来实现的。

Bazh 等[40]的试验中发现，姜黄素存在一定的杀虫作用，杀虫效果与其浓度和处理时间相关。Khalafalla 等[41]研究表明，与对照组相比，球虫孢子感染性在添加姜黄素浓度为 100 和 200 μmol/L 时分别降低了 41.6%和 72.8%，并且姜黄素剂量低于 400 μmol/L 对于被感染细胞没有表现出负面影响。因此，姜黄素可以考虑作为潜在的抗虫剂。

3　姜黄素在畜牧生产中的应用

3.1　在家禽生产中的应用

姜黄素具有改善家禽生产性能、提高免疫力的作用。研究表明，分别添加 200 和 250 mg/kg 的姜黄素，可使肉鸡全期增重提高 4.48%和 1.59%，料重比降低 7.39%和 6.40%[42]，其中 200 mg/kg 的剂量效果极显著[43]。据 Platel 等[44]报道，通过在大鼠的饲粮中加入 5 g/kg 的姜黄素，胰酶活性显着增强，因而，姜黄素促进肉鸡生长性能的机制可能是通过刺激肠道消化酶的产生或增强消化酶活性来提高饲粮消化率的；同时，研究表明，NO 作为 *L*－精氨酸分解的重要产物[45]，是肠道中重要的抑制性神经递质，有抑制胃肠蠕动的功能[46]。结合姜黄素抑炎的生理功能分析，姜黄素可能通过抑制 *L*－精氨酸转化 NO 过程中的酶活性，抑制 NO 的产生，从而促进胃肠蠕动，提高采食量。此外，Zhang 等[14]的试验发现，添加姜黄素有利于缓解应激对肉鸡生产的影响，因此，缓解应激损伤可能也是提高生长性能的一个重要原因。研究表明，添加姜黄素可以显著提高肉鸡胸腺指数[47]、脾脏指数[48]、抗体[47]和总蛋白水平[48]。免疫器官指数反映了免疫器官发育的状态，姜黄素促进其发育的机制可能是通过总蛋白水平的提升，提高机体对蛋白质的吸收利用，为免疫器官健康生长提供条件；而对于抗体水平的提升，与姜黄素促进胸腺发育、影响 T 淋巴细胞分化成熟，进而提升了 T

淋巴细胞刺激 B 淋巴细胞产生抗体的过程有关。

姜黄素还具有改善肉色和保鲜度[49-50]、提高肌肉营养价值的功能[42,51]。其机制与姜黄素的强抗氧化性有关，家禽肌肉中主要负责肉色调节的肌红蛋白，氧化后可能导致肌肉变色[52]；肌肉中含较高浓度的多不饱和脂肪酸，易被自由基攻击，引发脂质过氧化反应，积累过氧化产物，最终影响肉质和营养成分[53]。强抗氧化性的姜黄素可以很好地避免肌红蛋白过度的氧化，也防止了鲜肉中肌肉细胞过快的氧化坏死。同时，姜黄素利用其对于肉鸡脂肪代谢和沉积的重要调控作用，改善了鸡肉中的营养价值。

3.2 在猪生产中的应用

研究表明，添加姜黄素具有提高猪的饲粮消化率[54]及生产性能的功能[55]，其作用甚至显著优于喹诺酮[56-57]。其机制可能与姜黄素对肠道的调节作用有关，在 Xun 等[56]大肠杆菌攻毒仔猪研究中发现，添加姜黄素可显著增加回肠绒毛高度与隐窝深度的比值，改善回肠上皮黏膜形态，修复大肠杆菌对肠道造成的破坏。可以认为，姜黄素对肠道的保护为机体养分的消化和吸收以及生产性能的提升提供了条件。同时，姜黄素发挥抗菌抗虫的功能和减少应激的影响，也是姜黄素提高猪生产性能的可能机理。

研究表明，姜黄素还对猪肉品质也有调节作用[58]。祝国强等[58]研究发现，饲粮中添加 300 和 400 mg/kg 的姜黄素后，瘦肉率和肌肉 pH 显著提高，背膘厚和肌肉滴水损失显著降低，宰后肉质保鲜能力和肌肉品质显著提高。对于瘦肉率和背膘厚的调节，一方面可能是通过激活谷胱甘肽过氧化物酶，抑制了磷酸戊糖途径的氧化过程，进而影响了脂质合成；另一方面，可能通过姜黄素降脂的功能促进脂质的代谢和排出。肌肉内 pH 能改变蛋白质的电荷，当屠宰后，鲜肉的 pH 会出现下降，到达等电点，肌肉中蛋白质发生凝固和收缩，产生较多自由水，出现滴水损失。因此，添加姜黄素提高鲜肉中 pH，可以一定程度上减少滴水损失，同时凭借其抗氧化性，保持肉质新鲜。

3.3 在反刍动物中的应用

反刍动物中的报道很少，仅限于提高种畜精子质量和精液保存。研究表明，在精液保存过程中添加姜黄素可显著提高精子冻存前和解冻后的抗氧化能力[59]、线粒体活性和精子活力，保证精子品质[60]。这是因为精子结构中含有较高浓度不饱和脂肪酸，易受到自由基的破坏[61]，而姜黄素可能利用其脂溶性，进入精子内部，结合冻存冻融过程产生的过量自由基，保护线粒体膜及精子膜结构，保证精子品质。

4 小 结

综上所述，姜黄素具有重要的生理功能，且作为饲料添加剂能够提高畜禽生产性能，提升畜产品品质。但目前在畜禽生产应用方面的研究有限，且研究畜禽种类相对单一，作用机制不清。当前，“无抗养殖”是全球解决抗生素滥用造成的安全问题的趋势，因此迫切需要进一步研究姜黄素在各种畜禽的适宜添加剂量、对不同畜禽品种的作用效果和调节机制，为姜黄素在畜牧生产中应用奠定理论基础。

参考文献：

[1] SHARMA R A,GESCHER A J,STEWARD W P.Curcumin:the story so far[J].European Journal of Cancer,2005,41(13):1955–1968.

[2] KALYAN S,SHARMA P K,GARG V K,et al.Recent advancement in chitosan based formulations and its pharmaceutical application[J].Der Pharmacia Sinica,2010,1(3):195–210.

[3] MILOBEDZKA J,KOSTANECKI V,LAMPE V.Structure of curcumin[J].Chemische Berichte,1910,43:2163–2170.

[4] ESATBEYOGLU T,HUEBBE P,ERNST I M A,et al.Curcumin-from molecule to biological function[J].Angewandte Chemie：International Edition,2012,51(22):5308–5332.

[5] GOEL A,KUNNUMAKKARA A B,AGGARWAL B B.Curcumin as "*Curecumin*":from kitchen to clinic[J].Biochemical Pharmacology,2008,75(4):787–809.

[6] PRIYADARSINI K I,MAITY D K,NAIK G H,et al.Role of phenolic O-H and methylene hydrogen on the free radical reactions and antioxidant activity of curcumin[J].Free Radical Biology and Medicine,2003,35(5):475–484.

[7] KANEKO T,BABA N.Protective effect of flavonoids on endothelial cells against linoleic acid hydroperoxide-induced toxicity[J].Bioscience,Biotechnology,and Biochemistry,1999,63(2):323–328.

[8] OSAWA T,SUGIYAMA Y,INAYOSHI M,et al.Antioxidative activity of tetrahydrocurcuminoids[J].Bioscience,Biotechnology,and Biochemistry,1995,59(9):1609–1612.

[9] SUGIYAMA Y,KAWAKISHI S,OSAWA T.Involvement of the β-diketone moiety in the antioxidative mechanism of tetrahydrocurcumin[J].Biochemical Pharmacology,1996,52(4):519–525.

[10] JOVANOVIC S V,STEENKEN S,BOONE C W,et al.H-atom transfer is a preferred antioxidant mechanism of curcumin[J].Journal of the American Chemical Society,1999,121(41):9677–9681.

[11] MIRIYALA S,PANCHATCHARAM M,RENGARAJULU P.Cardioprotective effects of curcumin[M]//AGGARWAL B B,SURH Y J,SHISHODIA S.The molecular targets and therapeutic uses of curcumin in health and disease.US:Springer,2007.

[12] DENG S L,CHEN W F,ZHOU B,et al.Protective effects of curcumin and its analogues against free radical-induced oxidative haemolysis of human red blood cells[J].Food Chemistry,2006,98(1):112–119.

[13] ZHANG J F,HOU X,AHMAD H,et al.Assessment of free radicals scavenging activity of seven natural pigments and protective effects in AAPH-challenged chicken erythrocytes[J].Food Chemistry,2014,145:57–65.

[14] ZHANG J F,HU Z P,LU C H,et al.Dietary curcumin supplementation protects against heat-stress-impaired growth performance of broilers possibly through a mitochondrial pathway[J].Journal of Animal Science,2015,93(4):1656–1665.

[15] TORGOVNICK A,SCHIAVI A,MAGLIONI S,et al.Healthy aging:what can we learn from *Caenorhabditis elegans*?[J].Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie,2013,46(7):623–628.

[16] SHIH C M,WU J S,KO W C,et al.Mitochondria-mediated caspase-independent apoptosis induced by cadmium in normal human lung cells[J].Journal of Cellular Biochemistry,2003,89(2):335–347.

[17] WASEEM M,PARVEZ S.Mitochondrial dysfunction mediated cisplatin induced toxicity:modulatory role of curcumin[J].Food and Chemical Toxicology,2013,53:334–342.

[18] TRUJILLO J,MOLINA-JIJÓN E,MEDINA-CAMPOS O N,et al.Curcumin prevents cisplatin-induced decrease in the tight and adherens junctions:relation to oxidative stress[J].Food & Function,2015,7(1):279–293.

[19] DORTA D J,PIGOSO A A,MINGATTO F E,et al.The interaction of flavonoids with mitochondria:effects on energetic processes[J].Chemico-Biological Interactions,2005,152(2/3):67–78.

[20] ITOH K,WAKABAYASHI N,KATOH Y,et al.Keap1 regulates both cytoplasmic-nuclear shuttling and degradation of Nrf2 in response to electrophiles[J].Genes to Cells,2003,8(4):379–391.

[21] 王恬, 张婧菲.姜黄素的理化特性、抗氧化功能及其在肉鸡生产中的应用[J].动物营养学报,2014,26(10):3101–3107.

[22] GAO S,DUAN X X,WANG X,et al.Curcumin attenuates arsenic-induced hepatic injuries and oxidative stress in experimental mice through activation of Nrf2 pathway,promotion of arsenic methylation and urinary excretion[J].Food and Chemical Toxicology,2013,59:739–747.

[23] SAHIN K,ORHAN C,TUZCU Z,et al.Curcumin ameloriates heat stress via inhibition of oxidative stress and modulation of Nrf2/HO-1 pathway in quail[J].Food and Chemical Toxicology,2012,50(11):4035–4041.

[24] NAKAI N,MURATA M,NAGAHAMA M,et al.Oxidative DNA damage induced by toluene is involved in its male reproductive toxicity[J].Free Radical Research,2003,37(1):69–76.

[25] CHAN J Y,KWONG M.Impaired expression of glutathione synthetic enzyme genes in mice with targeted deletion of the Nrf2 basic-leucine zipper protein[J].Biochimica Et Biophysica Acta (BBA)：Gene Structure and Expression,2000,1517(1):19–26.

[26] ZHENG S Z,FU Y M,CHEN A P.*De novo* synthesis of glutathione is a prerequisite for curcumin to inhibit hepatic stellate cell (HSC) activation[J].Free Radical Biology and Medicine,2007,43(3):444–453.

[27] SANDUR S K,ICHIKAWA H,PANDEY M K,et al.Role of pro-oxidants and antioxidants in the anti-inflammatory and apoptotic effects of curcumin (diferuloylmethane)[J].Free Radical Biology and Medicine,2007,43(4):568–580.

[28] RAO C V.Regulation of COX and LOX by curcumin[J]//AGGARWAL B B,SURH Y J,SHISHODIA S.The molecular targets and therapeutic uses of curcumin in health and disease.US:Springer,2007.

[29] NISHINO H,TOKUDA H,SATOMI Y,et al.Cancer prevention by antioxidants[J].Biofactors,2004,22(1/2/3/4):57–61.

[30] POMERANTZ J L,BALTIMORE D.Two pathways to NF-κB[J].Molecular Cell,2002,10(4):693–695.

[31] 彭景华, 曹健美, 王晓柠, 等.姜黄素对内毒素脂多糖诱导的库普弗细胞分泌炎症细胞因子的抑制作用[J].中国中西医结合消化杂志,2006,14(4):211–214.

[32] REUTER S,CHARLET J,JUNCKER T,et al.Effect of curcumin on nuclear factor κB signaling pathways in human chronic myelogenous K562 leukemia cells[J].Annals of the New York Academy of Sciences,2009,1171(1):436–437.

[33] PATIL T N,SRINIVASAN M.Hypocholesteremic effect of curcumin in induced hypercholesteremic rats[J].Indian Journal of Experimental Biology,1971,9(2):167–169.

[34] SHIN S K,HA T Y,MCGREGOR R A,et al.Long-term curcumin administration protects against atherosclerosis via hepatic regulation of lipoprotein cholesterol metabolism[J].Molecular Nutrition Food Research,2011,55(12):1829–1840.

[35] EJAZ A,WU D Y,KWAN P,et al.Curcumin inhibits adipogenesis in 3T3-L1 adipocytes and angiogenesis and obesity in C57/BL mice[J].Journal of Nutrition,2009,139(5):919–925.

[36] SCHRAUFSTÄTTER E,BERNT H.Antibacterial action of curcumin and related compounds[J].Nature,1949,164(4167):456–457.

[37] RAI D,SINGH J K,ROY N,et al.Curcumin inhibits FtsZ assembly:an attractive mechanism for its antibacterial activity[J].Biochemical Journal,2008,410(1):147–155.

[38] LÜER S,TROLLER R,AEBI C.Antibacterial and antiinflammatory kinetics of curcumin as a potential antimucositis agent in cancer patients[J].Nutrition and Cancer,2012,64(7):975–981.

[39] TYAGI P,SINGH M,KUMARI H,et al.Bactericidal activity of curcumin Ⅰ is associated with damaging of bacterial membrane[J].PLoS One,2015,10(3):e0121313.

[40] BAZH E K A,EL-BAHY N M.*In vitro* and *in vivo* screening of anthelmintic activity of ginger and curcumin on *Ascaridia galli*[J].Parasitology Research,2013,112(11):3679–3686.

[41] KHALAFALLA R E,MÜLLER U,SHAHIDUZZAMAN M,et al.Effects of curcumin(difer-uloylmethane) on *Eimeria tenella* sporozoites *in vitro*[J].Parasitology Research,2011,108(4):879–886.

[42] 祝国强, 侯风琴. 姜黄素对肉仔鸡日增重、脂质代谢、肉品质的影响[J].饲料博览,2007(2):49–51.

[43] 崔岩, 祝国强, 侯风琴, 等.姜黄素对肉鸡生产性能和生化指标的影响[J].畜牧与兽医,2010,42(8):44–46.

[44] PLATEL K,SRINIVASAN K.Influence of dietary spices or their active principles on digestive enzymes of small intestinal mucosa in rats[J].International Journal of Food Sciences and Nutrition,1996,47(1):55–59.

[45] GRASA L,ARRUEBO M P,PLAZA M A,et al.A downregulation of nNOS is associated to

dysmotility evoked by lipopolysaccharide in rabbit duodenum[J].Journal of Physiology & Pharmacology,2008,59(3):511–524.
[46] 罗霜, 于小玲, 李红静.姜黄素对小鼠胃肠蠕动的影响及其作用机制[J].齐鲁医学杂志,2012,27(5):430–431.
[47] 胡忠泽, 金光明, 王立克,等.姜黄素对肉鸡生产性能和免疫机能的影响[J].粮食与饲料工业,2004(10):44–45.
[48] 周璐丽, 周汉林, 王定发.姜黄提取物对文昌鸡生长性能、血液生化指标和免疫器官指数的影响[J].饲料工业,2016,37(18):5–8.
[49] ZHANG J F,HU Z P,LU C H,et al.Effect of various levels of dietary curcumin on meat quality and antioxidant profile of breast muscle in broilers[J].Journal of Agricultural & Food Chemistry,2015,63(15):3880–3886.
[50] 祝国强, 王斌, 侯风琴, 等.姜黄素对肉鸡生产性能及肉品质的影响[J].饲料工业,2009,30(13):8–10.
[51] 胡忠泽, 王立克, 闻爱友.姜黄素对皖江黄鸡脂肪代谢的影响[J].粮食与饲料工业,2008(4):29–30,33.
[52] SUMAN S P,JOSEPH P.Myoglobin chemistry and meat color[J].Annual Review of Food Science and Technology,2013,4(1):79–99.
[53] FINKEL E.The mitochondrion:is it central to apoptosis?[J].Science,2001,292(5517):624–626.
[54] 芦娜, 邱静芸, 应志雄, 等.日粮添加不同水平姜黄素对断奶仔猪生产性能、消化率和血液指标的影响[J].家畜生态学报,2017,38(1):30–35.
[55] 赵春萍, 荀文娟, 侯冠彧, 等.姜黄素对大肠杆菌攻毒仔猪生长性能和抗氧化性能的影响[J].家畜生态学报,2015,36(7):24–27.
[56] XUN W J,SHI L G,ZHOU H L,et al.Effects of curcumin on growth performance,jejunal mucosal membrane integrity,morphology and immune status in weaned piglets challenged with enterotoxigenic *Escherichia coli*[J].International Immunopharmacology,2015,27(1):46–52.
[57] 周明, 张靖, 申书婷, 等.姜黄素在育肥猪中应用效果的研究[J].中国粮油学报,2014,29(3):67–73.
[58] 祝国强, 张伟涛, 陈涛, 等.姜黄素添加剂对育肥猪胴体 GP、肉品质及血液生化指标的影响[J].饲料工业,2013(16):9–12.
[59] SHAH S A H,ANDRABI S M H,QURESHI I Z.Freezability of water buffalo bull (*Bubalus bubalis*) spermatozoa is improved with the addition of curcumin (diferuoyl methane) in semen extender[J].Andrologia,2016.doi:10.1111/and.12713.
[60] TVRDÁ E,TUŠIMOVÁ E,KOVÁČIK A,et al.Curcumin has protective and antioxidant pro-perties on bull spermatozoa subjected to induced oxidative stress[J].Animal Reproduction Science,2016,172:10–20.

[61] ANDRABI S M.Factors affecting the quality of cryopreserved buffalo (*Bubalus bubalis*) bull spermatozoa[J].Reproduction in Domestic Animals,2009,44(3):552–569.

Physiological Functions of Curcumin and Its Application in Livestock and Poultry Production

YANG Tai WANG Hui TIAN Kexiong* CHEN Jifa

（*College of Animal Science, Hunan Agricultural University, Changsha* 410128*, China*)

Abstract: Curcumin, a kind of yellow pigment, is extracted from the roots of turmeric, which has the effects of antioxidation, anti-inflammatory and hypolipidemic, et al. As a feed additive with natural ingredients, curcumin has bright application prospect in animal industry. It could enhance livestock's performance, improve production quality and strengthen immunity. This paper aimed to illustrate the physiological functions and mechanism of curcumin and reviewed the latest research findings on the application in livestock and poultry production, which could be regarded as a reference for application of curcumin.

Key words: curcumin; plant extracts; physiological function; mechanism; livestock and poultry production; application

---

*Corresponding author, professor, E-mail: tiankexiong@163.com (责任编辑 田艳明)